

Применение ПЛИС в цифровой обработке сигналов

Д. В. Гайворонский¹, Май Тунг Зыонг², Ле Ван Чунг³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹dvg@etu.ru, ²maitungduong@mail.ru, ³letrungqh89@gmail.com

Аннотация. Программно-определяемые радиосистемы (SDR) на базе ПЛИС позволяют создавать эффективные системы обработки радиосигналов с высокой скоростью и минимальной задержкой. Параллельная обработка данных и гибкое использование на ПЛИС и дает им преимущество перед другими процессорами. Моделирование в GNU Radio подтвердило возможность использования ПЛИС в SDR. Эти технологии открывают перспективы для разработки высокопроизводительных радиосистем для современных приложений.

Ключевые слова: SDR; GNU Radio; ПЛИС; цифровая обработка сигналов.

I. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современных технологиях тест-системы играют важную роль в оптимизации времени и производственных затрат для исследования новых задач. Эти тест-системы помогают моделировать, выявлять проблемы и исправлять ошибки на основе результатов испытаний, что повышает их производительность и точность. Благодаря тест-системам разработчики и компании могут снижать затраты и сокращать время разработки, при этом обеспечивая высокое качество. В рамках данной работы исследуется и разрабатывается тест-система цифровой обработки сигналов на основе технологий SDR и ПЛИС для удовлетворения требований к скорости и гибкости реальных случаев. Их схема размещения представлена на рис. 2. Простой пример использования тест-системы также приводится в разделе IV. Используемые программы в системе: GNU Radio, Quartus, ModelSim, MATLAB.

II. SDR ТЕХНОЛОГИЯ

SDR – это система радиосвязи, в которой компоненты, традиционно реализованные в аналоговом оборудовании (например, фильтры, усилители, модуляторы/демодуляторы, детекторы и т. д.), вместо этого реализуются с помощью программного обеспечения на персональном компьютере или представляют собой встроенную систему [1].

Базовая система SDR может состоять из персонального компьютера, звуковой карты или другого аналогово-цифрового преобразователя. Значительный объем обработки передается процессору общего назначения, а не аппаратному обеспечению специального назначения (электронным схемам). Такая конструкция создает радиосистему, которая может принимать и передавать различные радиосигналы на основе программного обеспечения. Радиостанции на основе SDR имеют большое значение для радионавигационных, радиолокационных систем и служб сотовой связи, которые должны обслуживать

широкий спектр разнообразных радиосигналов в режиме реального времени.

A. Принципы работы SDR

Супергетеродинные приемники используют смеситель и фильтр для настройки полезного сигнала на общую промежуточную частоту или полосу модулирующих частот. Обычно в SDR этот сигнал затем дискретизируется аналого-цифровым преобразователем. Однако в некоторых приложениях нет необходимости настраивать сигнал на промежуточную частоту, и радиочастотный сигнал напрямую дискретизируется аналого-цифровым преобразователем после усиления. Схема функционирования SDR представлена на рис. 1.

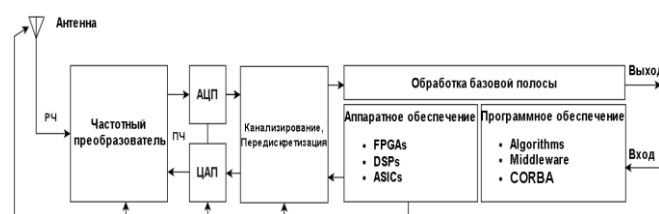


Рис. 1. Схема работы SDR

B. Программа GNU Radio

Программа GNU Radio – это свободное и открытое программное обеспечение, которое предоставляет набор инструментов и библиотек для разработки радиосистем и цифровой обработки сигналов [2].

GNU Radio содержит блоки и функции, которые позволяют разработчикам строить радиосистемы, модулировать и демодулировать сигналы, обрабатывать и анализировать данные, а также выполнять другие операции цифровой обработки сигналов. Она поддерживает многие радиосистемы, включая радио на основе программного обеспечения, радионавигацию, радиолокацию, радиосвязь, спутниковую связь и другие технологии. Одной из основных особенностей GNU Radio является его графический интерфейс, который позволяет разработчикам создавать диаграммы для визуальной обработки сигналов.

III. ПЛИС ТЕХНОЛОГИЯ

A. ПЛИС особенности

ПЛИС – это программируемая логическая интегральная схема, которая включает в себя большое количество логических элементов, а соединения между ними программируются с использованием специализированного программного обеспечения. Скорость ПЛИС ограничена только скоростью движения электронов через проводники и логические элементы, и она может обрабатывать гигабиты в секунду. Кроме

того, на одной ПЛИС можно создавать несколько независимых логических схем, что позволяет выполнять параллельные вычисления одновременно [3]. Другим преимуществом ПЛИС является её гибкое использование и возможность многократного перепрограммирования. В отличие от ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), который разрабатывается для конкретной цели, не может быть перепрограммирован и требует, чтобы проект был безошибочным до начала производства. Продукты на основе ПЛИС, даже если они содержат ошибки, могут быть обновлены и исправлены после доставки клиентам. Табл. I представляет обзор рабочих характеристик ПЛИС по сравнению с ASIC.

ТАБЛИЦА I. ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛИС И ASIC

Параметр	ПЛИС	ASIC
Стоимость (малые количества)	Средняя	Высокая
Стоимость (большие количества)	Средняя	Низкая+
Скорость	Высокая	Высокая+
Питание	Среднее	Низкое
Гибкость	Высокая	Отсутствует
Простота использования	Средняя	Низкая

В. Принципы работы SDR на базе ПЛИС

Перед созданием процессоров на базе ПЛИС, тестирование на тестовых платах ПЛИС является важным этапом для обеспечения точности процесса обработки сигналов, а также для оценки точности вычислений, скорость обработки и совместимость с другими системами. Особенно в случае разработки DSP или ASIC на основе ПЛИС, тестирование на тестовых платах помогает оптимизировать проектирование и гарантирует, что конечные продукты будут соответствовать требованиям. Схема размещения представлена на рис. 2.

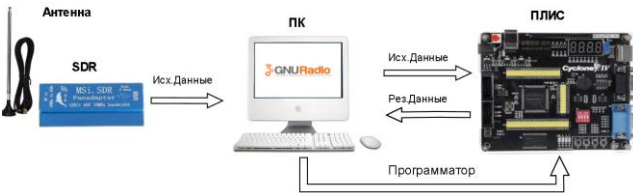


Рис. 2. Макет в сборе

Для проверки работы программы на ПЛИС, выполняются следующие этапы:

1. Интересующие сигналы принимаются с устройства SDR и сохраняются в виде файла данных на компьютере.
2. Использование GNU Radio для моделирования процесса обработки сигналов на ПЛИС.
3. Исходные данные из файла на компьютере отправляются в ПЛИС через стандартные соединения, такие как UART, Ethernet и т. д., и обрабатываются на ПЛИС в соответствии с требованиями задачи.
4. После обработки данные отправляются обратно на компьютер. GNU Radio и другие программные средства

используются для проверки точности разработанных блоков обработки сигналов на ПЛИС.

5. На основе результатов проверки проводятся исправления ошибок, оптимизация алгоритма.

IV. ИСПЫТАНИЯ И ОЦЕНКА ПОСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ

Для конкретной иллюстрации работы системы можно привести задачу создания КИХ-фильтра, что является одной из базовых задач в цифровой обработке сигналов. Спектр сигнала после приема ЧМ-радиосигнала с помощью устройства SDR, полученный с использованием программы GNU Radio, содержит четыре радиостанции, что показано на рис. 3. Задача ПЛИС заключается в фильтрации сигнала, оставляя только одну радиостанцию [4, 5].

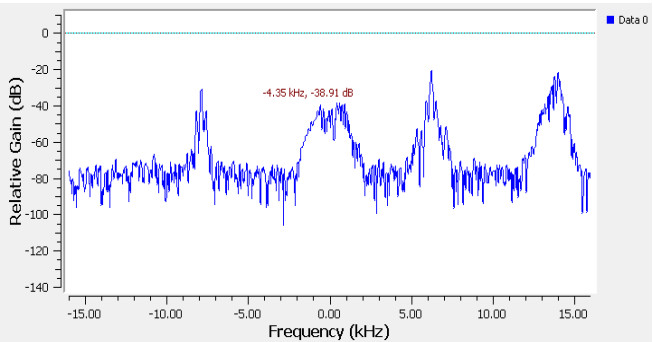


Рис. 3. Спектр сигнала до обработки

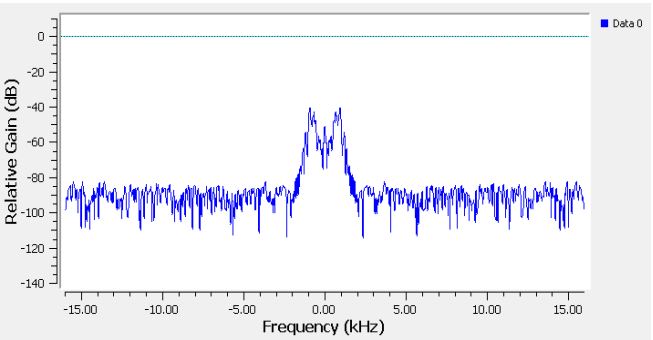


Рис. 4. Сигнал после фильтрации через ПЛИС

Полученные данные будут отправлены через интерфейс RS232 на тестовых платах ПЛИС для обработки, а затем возвращены в компьютер. Для программирования ПЛИС используются языки описания аппаратуры (HDL), которые загружаются в ПЛИС через программное обеспечение, предоставленное производителем. Рис. 5 представляет пример проектирования блоков приема, обработки и передачи данных. Однако перед обработкой данных на ПЛИС, необходимо смоделировать ее с помощью инструментов временного моделирования, таких как ModelSim, чтобы убедиться, что сигнал обрабатывается корректно. Рис. 6 описывает пример временной диаграммы работы фильтра с четырьмя коэффициентами. Назначение сигналов системы описано в табл. II.

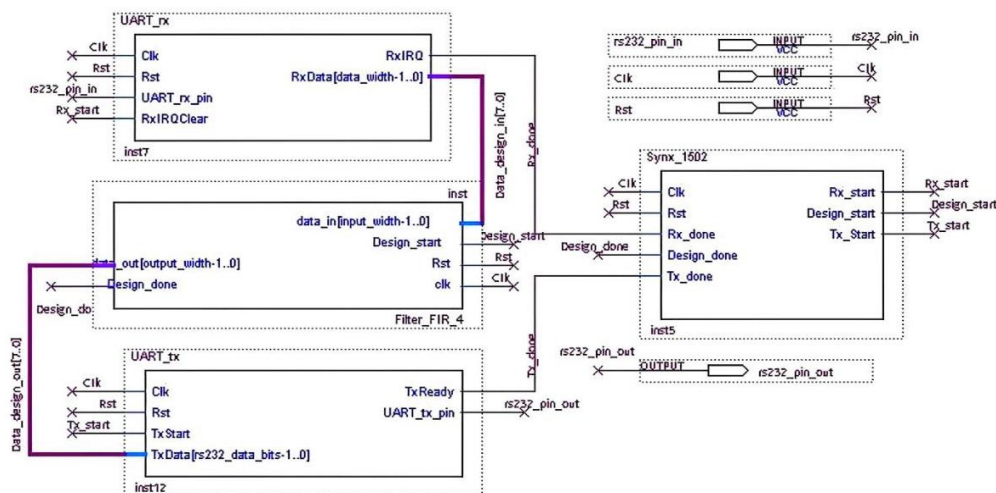


Рис. 5. Схема приема, обработки и передачи сигнала

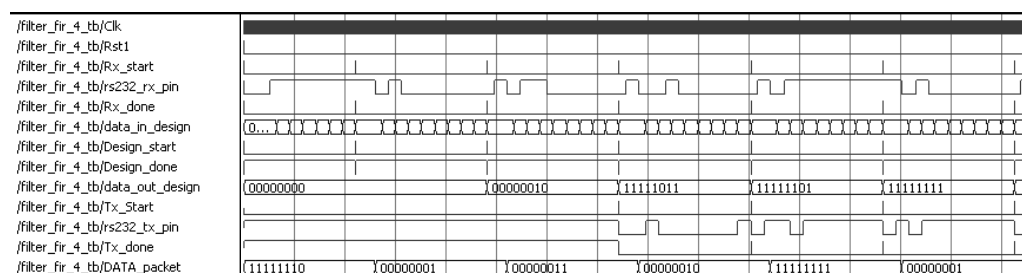


Рис. 6. Временная диаграмма

ТАБЛИЦА II. НАЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ

Сигнал	Описание
Clk	Тактовый сигнал для управления работой блока
Rst1	Сигнал сброса, используемый для возврата к состоянию по умолчанию
rs232_rx_pin	Входной сигнал
rs232_tx_pin	Выходной сигнал
Rx_start	Сигнал, уведомляющий блок о готовности принять следующий пакет данных от ПК
Design_start	Сигнал, который информирует фильтр о том, когда необходимо начать обработку сигнала
Tx_start	Сигнал, уведомляющий блок о готовности принять следующий пакет данных с блока обработки
Rx_done	Сигнал, уведомляющий о готовности передать данные в блок обработки сигналов
Design_done	Сигнал, уведомляющий о завершении обработки данных.
Tx_done	Сигнал, подтверждающий завершение передачи данных ПК

Коэффициенты фильтра, входные данные, выходные данные и состояние регистра описаны в табл. III.

ТАБЛИЦА III. ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРА

Номер шага	Индекс регистра				Выходные значения	Выходные сигналы
	1	2	3	4		
Коэффициенты фильтра	-1	2	1	3		
1	-2	0	0	0	2	0 00000010 1
2	1	-2	0	0	-5	0 11111011 1
3	3	1	-2	0	-3	0 11111101 1
4	2	3	1	-2	-1	0 11111111 1
5	-1	2	3	1	11	0 00001011 1

После завершения моделирования и удовлетворения всем требованиям задачи обработанные данные будут возвращены и отображены в виде спектра сигнала, содержащего только одну радиостанцию, как было предусмотрено. Другие инструменты, например, такие как внешние динамики или анализатор данных, помогут

проверить точность обработки сигнала. Это всего лишь простой пример процесса тестирования обработки сигналов на ПЛИС. Более сложные задачи, такие как кодирование/декодирование канала, пространственно-временная модуляция сигналов в радионавигационных, радиолокационных системах и т. д., также могут быть реализованы и протестированы на ПЛИС до реального применения.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показано, что можно отметить огромный потенциал использования систем, создаваемых с помощью программного обеспечения SDR и ПЛИС для реализации эффективных систем обработки радиосигналов. Использование SDR и ПЛИС может значительно повысить скорость обработки и снизить задержку, что особенно важно для реальных задач, таких как радионавигационные системы, радиолокационные системы и автономные технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] E4k and RTL2832U based Software Defined Radio – SDR) J.-M Friedt, G. Goavec-M'rou, 3 decembre 2012.
- [2] Software-defined radio // «Википедия, свободная энциклопедия». URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio (дата обращения: 28.02.2025).
- [3] Ссылка на материалы по ПЛИС FPGA Cyclone IV: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/210472/cyclone-iv-ep4ce6-fpga/specifications.html>
- [4] Designing FM Receiver Using GNU Radio and RTL-SDR Dongle. URL: <https://www.electronicsforu.com/electronics-projects/fm-receiver-gnu-radio-rtl-sdr-dongle> (дата обращения: 01.03.2025).
- [5] Прокис Джон. Цифровая связь. Пер. с англ. /Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь. 2000.